Biochar production as an alternative for energetic valorization or residual biomass generated in the Ecuadorian agroindustrial sector: a participative approach

Producción de biochar como alternativa para la valorización energética de la biomasa residual generada en el sector agroindustrial Ecuatoriano: un enfoque participativo

Mario A. Herdia-Salgado[1 y 2], Luis A.C. Tarelho[1].
[1]Departamento de Ambiente e Ordenamento (DAO) y Centro de Estudos do Ambiente e do Mar (CESAM). Universidade de Aveiro (Portugal). [2]Bioenergía de los Andes (BDZ), Quito (Ecuador). heredia.mario@ua.pt

Resumen

La producción de biochar a partir de la biomasa residual generada en procesos agroindustriales constituye una importante alternativa para mejorar el desempeño ambiental y económico de este sector. El presente trabajo presenta información tanto de carácter teórico como experimental del proceso que ha guiado el desarrollo de la primera planta piloto para la producción continua de biochar en Ecuador. Este proceso no utiliza ninguna fuente de energía externa (fósil o electricidad) para suplir las necesidades de energía térmica de la carbonización.

Abstract

The production of biochar from the residual biomass generated in agro-industrial processes constitutes an important alternative to improve the environmental and economic performance of this sector. This work presents theoretical and experimental information of the process that have led to the development of the first pilot plant for the continuous production of biochar in Ecuador. This process does not require energy from external sources (fossil or electricity) to supply the thermal energy required by the carbonization.

1. Introducción

El sector agroindustrial Ecuatoriano ha sido por años el motor no-petrolero de la economía del país, alcanzando entre el 2006 y el 2015, una participación sobre el PIB Nacional entre el 8 y 9% [1]. Sin embargo, la escasa adopción de nuevas tecnologías y las limitaciones para el desarrollo de nuevos productos siguen siendo un foco de oportunidad que no ha sido atendido de forma apropiada. Se han debatido posibles alternativas para potenciar el crecimiento agroindustrial del país, prestando singular atención al manejo sostenible de los residuos generados por este sector. En este sentido, se afirma que la integración de tecnologías apropiadas (co-generación, pirólisis, gasificación, etc.) permitiría la obtención de valiosos productos a partir de la transformación/refinación de estos residuos. Entre las tecnologías actualmente disponibles, la pirólisis constituye una importante alternativa para la valorización de estas biomasas, permitiendo además el ajuste adecuado para la obtención de diferentes productos. Como resultado de este proceso, se pueden generar compuestos de carácter sólido (materiales carbonosos), gaseoso (bio-gases), líquido (bio-aceites) o combinaciones entre ellos.

Recientemente, la producción de carbón vegetal por procesos pirolíticos ha ido adquiriendo especial relevancia. Además de su utilización típica como combustible, han surgido nuevas aplicaciones en el sector agrícola, donde actualmente es aplicado con el fin de mejorar las propiedades físicas y químicas de los suelos [2,3]. El uso de este material, llamado convencionalmente biochar (carbón de origen vegetal) incrementa la cantidad de materia orgánica del suelo, a la vez que modifica las condiciones de acidez (pH). Asimismo, altera los coeficientes de intercambio catiónico, permitiendo mejorar el rendimiento en diferentes tipos de cultivos. Debido a su estructura porosa, el biochar es también utilizado como un aditivo en zonas de baja pluviosidad, en las que se ha demostrado que es capaz de estabilizar el nivel de humedad en el suelo. Adicionalmente, la incorporación de biochar como estructurador y material de base para nutrientes durante el proceso de compostaje, ha optimizado la degradación de la materia orgánica a la vez que reduce las emisiones de amonio y gases de efecto invernadero. Es conocida también su efectividad para reducir la absorción de metales pesados en suelos agrícolas contaminados. Alternativamente, se han comprobado una serie de beneficios como aditivo de dieta en la ganadería, porcicultura y avicultura. También, como material de cama en establos para reducir olores y emisiones. Finalmente, vale la pena recalcar que el uso de biochar como aditivo y enmienda de suelos es también considerado como una estrategia de mitigación al cambio climático, dada la capacidad de secuestrar carbono sólido en los campos agrícolas por cientos e inclusive, miles de años.

Es importante indicar que los usos y aplicaciones de biochar no están exentos de riesgos. Por un lado, es conocido que la producción de este material por medio de métodos tradicionales está asociado a impactos ambientales significativos debido a la liberación a la atmosfera de los gases pirolíticos resultantes. Asimismo, ha sido demostrado que el biochar puede contener compuestos peligrosos tanto de carácter orgánico como inorgánico, tales como hidrocarburos policíclicos aromáticos, metales pesados, y dioxinas

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

y furanos. De aquí la necesidad de implementar un control apropiado de las condiciones de operación del proceso de pirólisis, que permita reducir emisiones garantizando también la calidad, estabilidad y homogeneidad del biochar producido. Es por esto que el uso de biochar en suelos se encuentra sujeto al cumplimiento de ciertas propiedades [4]. Entre las directrices para la producción sostenible de biochar emitidas por la European for Biochar Foundation, se hace especial énfasis en el uso e integración del calor residual producido durante la carbonización. La recuperación del calor residual evita el vertido de los gases pirolíticos al ambiente, a la vez que aumenta la eficiencia del proceso. De forma complementaria, la integración del calor residual del proceso de carbonización en los procesos agroindustriales permitiría reemplazar el uso de combustibles de origen fósil actualmente utilizados para la producción de energía térmica.

Con base en lo anterior, la producción de biochar a partir de residuos de origen agrícola es una importante alternativa para diversificar el portafolio de productos y mejorar el desempeño ambiental y financiero del sector. El presente trabajo tiene como fin compartir las experiencias acumuladas en el desarrollo de un innovador sistema para la producción continua de biochar en Ecuador a partir de biomasa residual agrícola en el que se utiliza el gas de pirólisis para producir energía térmica.

2. Desarrollo conceptual: Investigación Acción Participativa (IAP)

Es bien conocido que el desarrollo tecnológico actual requiere enfoques extendidos, pensamiento divergente y celeridad con el fin de responder a la vertiginosidad con la que se generan productos y servicios a nivel industrial. Además de la premura tecnológica asociada a la producción del biochar, se prestó especial atención al contexto industrial y humano que caracteriza al sector agroindustrial Ecuatoriano. En este sentido, se tuvo en cuenta que el desarrollo de un sistema de producción combinada de biochar y energía térmica requería empatizar con las necesidades y expectativas de los principales actores de este sector. Con base en ello, se maximizaban las posibilidades de concebir una tecnología práctica y útil con suficiente potencial para provocar alteraciones positivas en las tradicionales operaciones agroindustriales.

La comprensión e incorporación de las necesidades y expectativas provenientes de los diferentes actores (pueblos indígenas originarios, asociaciones campesinas, gremios agroindustriales, ONG´s, prefecturas, universidades, institutos públicos de investigación, etc.) fue posible gracias a la implementación previa de un esquema de Investigación Acción Participativa (IAP) [5]. Si bien las estrategias IAP han sido ampliamente utilizadas en el ámbito de las ciencias sociales, son poco frecuentes en el campo de la ingeniería. La IAP es un modelo adaptado para el desarrollo comunitario especialmente en áreas rurales en países en desarrollo. Concretamente, la IAP toma como base las preocupaciones de una situación adversa que ocurre en un contexto social específico (escasa innovación y en este caso, deficiente gestión de residuos en el sector agroindustrial) y procura establecer acciones decididas que permitan alterar esa realidad. Es importante anotar que las decisiones sobre las acciones a implementar provienen mayoritariamente de los actores que forman parte del contexto social que se interviene. De este modo, la IAP valora y releva el conocimiento popular de los miembros de la comunidad.

Estas estrategias no constituyen un mero proceso de aprendizaje, sino que pretenden la producción simultánea de conocimiento y de cambio social. Este enfoque requiere una amplia apertura del investigador al intercambio cultural y una habilidad para la adaptación de contenidos, para que los resultados de la investigación puedan ser discutidos en un ambiente heterogéneo en cuanto a formación académica, creencias, cosmovisión, etc. Adicionalmente, la IAP demanda que el investigador involucrado tome una decidida iniciativa en el uso creativo de sus resultados, a la vez que realice seguimiento una vez recogida la información. Por lo tanto, además de planear y llevar a cabo un adecuado diseño experimental, el investigador asume la responsabilidad para develar formas en las cuales la investigación que desarrolla podría estimular cambios económicos, ambientales, políticos, o sociales. Bajo estos lineamientos, la IAP propone un proceso de implementación iterativo que comprende cuatro etapas: la planificación, la acción, la observación y la recopilación de resultados. Este proceso debe repetirse y adaptarse de forma cíclica a medida que se avanza en la comprensión del problema abordado, teniendo en cuenta la ineludible aparición de imprevistos.

Es así como la metodología IAP permite establecer un sólido marco metodológico que pone en evidencia que la sola transferencia de conocimientos básicos o aplicados, desde el laboratorio hacia la industria, así sean sorprendentemente sofisticados y excepcionalmente válidos para explicar fenómenos o sucesos específicos, resulta insuficiente al momento de configurar una alternativa tecnológica factible y con un alcance exponencial en el sector agroindustrial. Ciertamente, el uso de metodologías de investigación tradicionales y antagónicas a la IAP, junto a la linealidad implícita que las caracteriza, puede conducir al desconocimiento de la complejidad y elevada fragilidad del contexto en el que se desarrolla la investigación (en este caso: páramo andino, selva tropical, bosque seco ecuatorial). Por lo tanto, una intervención tecnológica y sostenible en estos ecosistemas, requiere un conocimiento contextualizado que considere la interrelación sistémica de los actores más relevantes en la cadena agroindustrial, así como las complejas interrelaciones de las comunidades multiétnicas y multiculturales asociadas a este sector.

Lo anterior condujo a varios viajes y visitas a fin de lograr un involucramiento con el sector indígena y campesino en sus diferentes actividades que permitiese la delimitación de los parámetros críticos del sistema de producción de biochar. Por ejemplo, se identificó la necesidad de concebir un dispositivo portátil para la valorización de biomasa residual de manera descentralizada con una capacidad de procesamiento inferior a lo que el mercado Europeo define como "escala de granja". Este ejercicio develó además un sector comercial con un conjunto de necesidades tecnológicas propias de los sistemas de pequeña escala que actualmente no está siendo atendido por los grandes desarrolladores de maquinaria. También, se identificó que las tecnologías actualmente disponibles en el mercado internacional se adaptan al uso de pellets o chips de madera, es decir, presentaciones y granulometrías típicas de los mercados norteamericanos o europeos, lo que podría causar caóticos resultados al momento de adaptar esas tecnologías en el medio local.

Por otro lado, el diálogo con organismos de cooperación y desarrollo (ONU, FAO, PNUD y CEFA, entre otros) permitió comprender la importancia del "asociativismo" y la necesidad de que las tecnologías promuevan espacios económicos donde las cooperativas campesinas tengan protagonismo. Es por demás lamentable que el sistema bancario Ecuatoriano se haya especializado en maximizar sus lucros, para posteriormente resguardarlos en lejanos paraísos fiscales. Por tanto, urge analizar mecanismos para que la fuerza del cooperativismo campesino sea capaz de financiar su propia infraestructura tecnológica impidiendo de algún modo esa perniciosa y criticable extracción de capitales practicada por el sistema bancario sobre las economías locales. Mediante una estrategia de despliegue adecuado, la tecnología para la valorización de la biomasa residual podría dar lugar a una extraordinaria alternativa para promover la circulación de capitales en las economías locales, y la creación de empleo tecnológico en el medio rural, vitalizando y fortaleciendo las economías populares y solidarias.

A partir de conversaciones con el sector público se evidenció la relevancia de integrar la energía térmica generada durante el proceso de carbonización, para la sustitución de combustibles fósiles que frecuentemente se usan para la generación de energía térmica en ciertos procesos típicos del sector agroindustrial. En este sentido, vale anotar que la política energética ecuatoriana mantiene un esquema de subsidios al diésel y GLP. Por lo tanto, esta integración energética permitiría reducir de forma sostenida los subsidios aplicados en el sector industrial. Con base en esta relación -entre la producción de biochar y el potencial de reemplazar combustibles fósiles- advertimos la existencia de un marco de incentivos fiscales que promueve la introducción de fuentes alternativas de energía. Recurriendo a métodos termoeconómicos, fue posible determinar que el monto de estos incentivos fiscales equivale al 50% de los costos asociados a la infraestructura inicial requerida para la implementación de un sistema de valorización de biomasa residual. A su vez, estas cifras permiten establecer un puente de diálogo y un lenguaje común entre las intenciones de innovación tecnológica y los intereses financieros de los gremios agroindustriales.

El diálogo ampliado con los actores más representativos de la cadena agroindustrial hizo prosperar el debate sobre la relevancia y potenciales impactos que tendría una tecnología capaz de transformar la biomasa residual agrícola en biochar y energía térmica. Sin embargo, una real medida de la idoneidad y la escalabilidad de tal proceso aún resultaban abstractos y dudosos para la mayoría de los actores consultados. Por ello, se procedió con una etapa experimental y demostrativa del proceso, donde se diseñó un prototipo que consideró las ideas debatidas, esquematizadas y ejemplificadas en los diferentes diálogos sostenidos con los actores involucrados. Fue así como se construyó un dispositivo a fin de aclarar las dudas sobre la real posibilidad de concebir y hacer operativa una planta a escala piloto capaz de producir biochar y energía térmica en simultáneo.

3. Desarrollo práctico: prototipado y evaluación experimental

Para la IAP, la etapa experimental no se restringe a la mera reproducción de condiciones laboratoriales controladas que permitan validar de forma experimental sofisticadas teorías o modelos numéricos de simulación. El desarrollo experimental, enmarcado en la acción como parte integral del proceso IAP, permite traspasar la intelectualización y el análisis de datos hacia la interacción directa con la problemática que se busca revertir. Prototipar, es una acción clara que trata sobre la producción simultánea de insumos para la divulgación científica y la praxis de carácter industrial, que además promueve y estimula el debate y la crítica tanto de los pares científicos como del resto de actores que componen la cadena agroindustrial. Es importante por tanto, que un prototipo no pretenda simbolizar la solución correcta. De este modo se facilita la sincera opinión de los actores involucrados y es posible incorporar las sugerencias que emergen de los espacios de diálogo, reduciendo a la vez las posibilidades de sesgos prematuros. Paralelamente, el prototipo permite también evaluar la medida en que se ha entendido el problema y su demarcación. Por lo tanto, el desarrollo de la planta piloto considera un proceso de pensamiento integral desplegado de forma colaborativa.

La concepción e implementación del prototipo integró una primera fase de simulación a partir de un modelo pirolítico [6] al que se le agregó una componente energética, y que permitió estimar de forma rápida y resumida las principales condiciones operativas de un sistema de pirólisis. Este modelo también consideró el uso del gas generado durante la carbonización

para la producción de la energía térmica requerida por el proceso, con el fin de configurar una unidad autónoma de producción de energía renovable. Además de estimar las principales características físico-químicas de los productos del proceso (biochar y gas pirolítico), este modelo numérico calculó las condiciones de frontera para operar el sistema bajo régimen auto-térmico. Adicionalmente, cuantificó los excedentes de energía térmica disponibles por encima de este régimen.

El sistema fue dividido en dos etapas. La primera etapa considera un proceso de combustión para el arranque del sistema de producción de biochar teniendo en cuenta como combustible la biomasa residual disponible en campo. Para esto, era necesario poner en marcha un dispositivo para la conversión de biomasa en energía térmica. La segunda etapa comprendería la integración de esa sección de combustión con la sección pirolítica, la cual considera un sistema de transporte por tornillo que incluiría los dispositivos de acopio, alimentación, descarga y almacenamiento de la biomasa, además de un protocolo de control a fin de evitar la entrada de oxígeno al sistema. La Figura 1, muestra ambos procesos integrados (combustión y pirólisis).

La segunda fase del proceso de prototipado consideró el levantamiento de modelos CAD/CAM. De acuerdo a la configuración propuesta, se diseñó un quemador de biomasa de llama horizontal en el que se alcanza una eficiencia de combustión entre 93.4 y 99.8%. Así mismo la concentración de CO en el gas efluente (260.1 mg/Nm^3) fue inferior al límite establecido por los estándares europeos para calderas que usan combustibles sólidos (<500 mg/Nm^3), condición importante que demuestra la idoneidad de la propuesta al momento de controlar emisiones.

De igual forma, se diseñó un mecanismo para el desalojo de las cenizas de combustión, adjuntando un novedoso y práctico método que tornaba factible la apropiada integración del quemador en la cámara de combustión que alberga el sistema de pirólisis. Dada la importancia de las cenizas en el esquema de valorización de la biomasa residual, se integró un mecanismo para el análisis de su constitución y de su rol en la estructura carbonosa del biochar. La Figura 2, muestra el modelo CAD/CAM del sistema y una vista general del mismo.

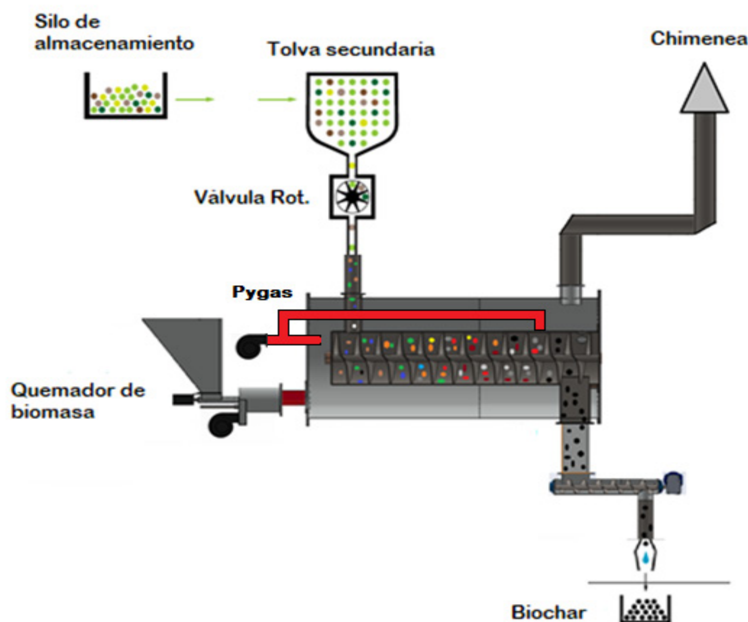


Figura 1. Esquema de la planta piloto utlizada para el análisis de la valoración energética de biomasa residual en Ecuador.

Figure 1. Scheme of the pilot plant used for the study of residual biomass energetic valorization in Ecuador.

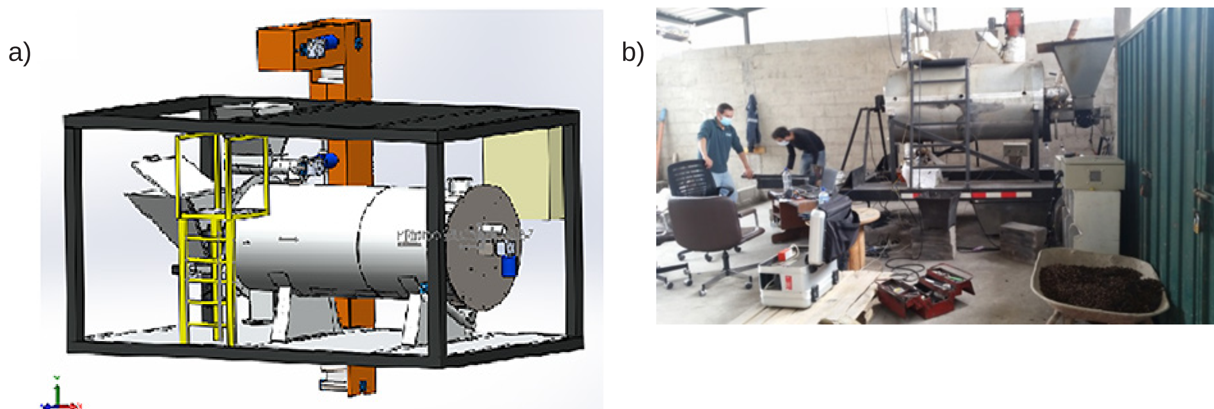


Figura 2. a) Modelo CAD/CAM de la planta piloto para la producción de biochar y energía térmica. b) Vista general del prototipo experimental.

Figure 2. a) CAD/CAM model of the pilot plant for the integrated production of biochar and thermal energy. b) Overview of the experimental facility.

La tercera fase del proceso de prototipado consistió en la integración de la sección de combustión y la sección de pirólisis. Para ello, se contó con las advertencias, experiencia y esfuerzos de una serie de técnicos y especialistas en el mecanizado, ensamblaje y montaje mecánico. Además de evitar recurrir a complejos métodos de soldadura, maquinado o fundición, se consideraron materiales y suministros disponibles localmente, con el fin de que futuros prototipos se construyan de manera rápida y ágil, facilitando inclusive su posterior reciclaje. Un importante indicador de resiliencia e innovación que se pretende alcanzar con este esquema, tiene que ver con la velocidad con que los prototipos son descartados y reemplazados por versiones mejoradas o adaptados a nuevas funcionalidades.

Bajo este mismo criterio, toda la instrumentación, control y automatización de ambas secciones (combustión y pirólisis) fue implementada sobre una plataforma de hardware y software de código abierto (Arduino LLC, Italia). La infraestructura experimental consta de un set de 7 termopares tipo K que monitorean constantemente el perfil de temperaturas en la cámara de combustión, así como las temperaturas de entrada y salida en el reactor de pirólisis y la temperatura con la que es inyectado el gas de pirólisis en la cámara de pre-mezcla (antes de oxidarse dentro de la cámara de combustión). De forma complementaria, la composición del gas efluente (CO, CO_2, HC, O_2) se monitorea en línea mediante un analizador de gases por infrarrojo (AU Mobile Brain Bee).

Actualmente el prototipo es capaz de procesar un límite de 50 kg/h de biomasa residual, bajo un régimen de operación continuo, alcanzando temperaturas en la zona de pirólisis de hasta 600 °C. Los tiempos de residencia en la región de pirólisis se pueden ajustar en un rango entre 5 y 45 minutos. La Figura 3 muestra una secuencia de las etapas del proceso de conversión termoquímica de biomasa residual de palma africana (15 min en el reactor de pirólisis), así como el perfil de temperaturas que caracteriza a cada uno de los procesos de combustión que se llevan a cabo; biomasa en estado sólido y gas de pirólisis, respectivamente.

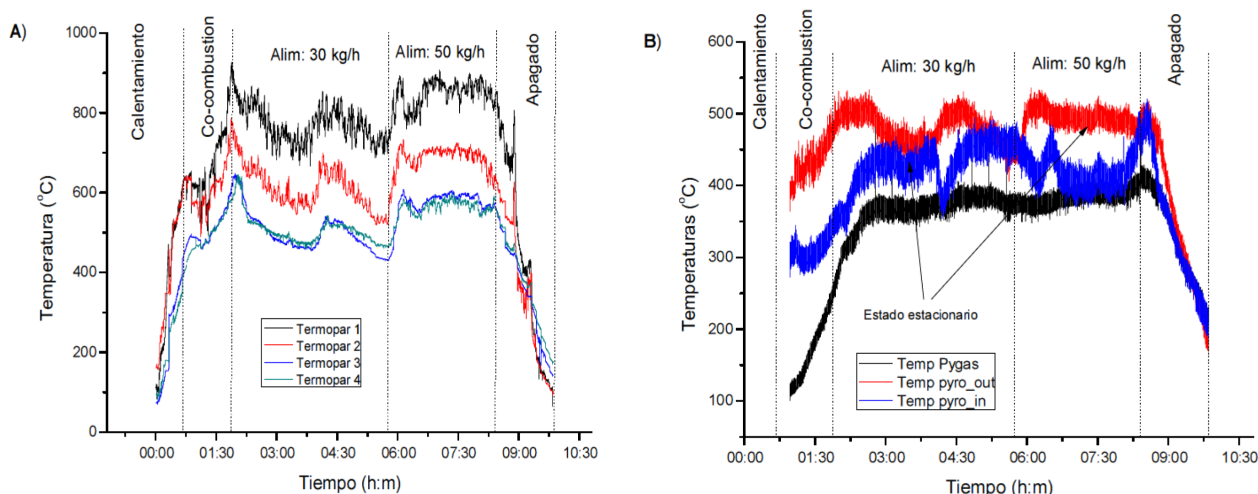


Figura 3. a) Etapas del proceso de conversión termoquímica. b) Transición del régimen transitorio a estado estacionario y perfil de temperaturas de la cámara de pirólisis (30 y 50 kg/h).

Figure 3. a) Sequence of the stages of the thermochemical conversion process. b) Transition from transient state to steady state and temperature profile in the pyrolysis chamber (30 and 50 kg/h).

De acuerdo con Brassard et al. [7] existen tres categorías para la clasificación de reactores de pirólisis de tipo tornillo: escala de laboratorio (< 1kg/h), escala piloto (1 – 15 kg/h) y escala industrial (> 15 kg/h). Según esta clasificación, el prototipo desarrollado es una de las pocas instalaciones de carácter experimental con una capacidad de procesamiento de 50 kg/h. Se resalta nuevamente que el sistema es capaz de combustionar directamente el gas de pirólisis para generar energía térmica, siendo capaz de operar bajo un régimen completamente auto-térmico. Como se muestra en la Figura 3, la operación del sistema se caracteriza por 3 etapas: etapa de calentamiento, etapa de co-combustión (en el que se queman de forma simultánea biomasa en estado sólido y el gas de pirólisis) y una etapa de régimen auto-térmico. Una vez alcanzada la temperatura óptima dentro de la cámara de pirólisis (en general, temperaturas mayores a 450°C), es posible disminuir la potencia del quemador de biomasa, hasta que el proceso se sustenta únicamente mediante la combustión del gas de pirólisis (régimen auto-térmico).

Se ha comprobado que es posible alcanzar regímenes de operación auto-térmicos cuando la capacidad de procesamiento del sistema se ubica por encima de los 30 kg/h (ver Figura 3). Sin embargo, es relevante indicar que no todas las experiencias que se han realizado durante las campañas experimentales han culminado bajo un régimen de operación auto-térmico. Este comportamiento se ha observado al pirolizar biomasas residuales con granulometrías y densidad específica bajas (por ejemplo: cáscara de quinua, cáscara de lupino, cáscara de café, bagazo de caña, etc).

Actualmente, el biochar producido está siendo caracterizado, considerando diferentes regímenes de operación y materias primas. Adicionalmente, en conjunto con algunas entidades Ecuatorianas, se están llevando a cabo ensayos de invernadero que buscan evaluar la capacidad que tendría el biochar producido para prevenir la adsorción de Cadmio en suelos contaminados que actualmente albergan cultivos de cacao.

4. Conclusiones

La necesidad de producir tecnología de manera endógena, con características especiales que demuestren una profunda empatía con las necesidades del medio local es una aspiración que no proviene solamente desde el sector agroindustrial, sino que es una demanda de todos los actores de la matriz productiva Ecuatoriana. Es de notar que los actuales paradigmas de comercio requieren innovaciones con una agilidad y celeridad difícilmente alcanzable por los habituales métodos practicados en la academia Ecuatoriana. A esta vertiginosidad, se le suma el complejo y esperanzador concurso de culturas y comunidades indígenas y campesinas únicas, ubicadas en ecosistemas frágiles y diversos. Frente a esta coyuntura, el proceso de desarrollo tecnológico requiere enfoques integrales y colaborativos. Las estrategias y métodos de Investigación Acción Participativa (IAP) ofrecen una plataforma ágil que permite empatizar con las necesidades y expectativas del medio y traducirlas en tecnología apropiada.

Este manuscrito muestra cómo, partiendo de la necesidad de incluir innovaciones para la gestión sustentable de los residuos generados por el sector agroindustrial, la IAP permitió identificar un conjunto de problemáticas conexas. A partir de tal diagnóstico, el proceso de investigación y desarrollo se orientó a la generación de herramientas que, usadas de forma creativa y decidida, fueron capaces de abordar estas realidades. Por tanto, se espera que la tecnología para la valorización energética explicada en este trabajo promueva cambios sustanciales en la manera en que se viene gestionando la biomasa residual en el sector agroindustrial Ecuatoriano, y que además sirva como punto de partida para abordar el resto de problemáticas que actualmente amenazan la producción sostenible de alimentos en el medio rural Ecuatoriano.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Comité Europeo para la formación y la Agricultura (CEFA), por el apoyo recibido en la implementación y validación de los prototipos en campo. Mario A. Heredia Salgado agradece a la beca del Instituto de Fomento al Talento Humano (IFTH) de la República del Ecuador.

Referencias

[1] Ministerio de Agricultura y Ganadería. Boletín Agrícola Integral - Nacional. Vol. V, N° 7, Julio de 2017. En línea en: http://sipa.agricultura.gob.ec/phocadownloadpap/tematicos_nacionales/a_integral/2017/boletin_agricola_integral_julio2017.pdf.

[2] Qian K, Kumar A, Zhang H, Bellmer D, Huhnke R. Recent advances in utilization of biochar. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2015, 42, 1055–1064.

[3] Lehmann J, Rillig MC, Thies J, Masiello CA, Hockaday WC, Crowley D. Biochar effects on soil biota - A review. Soil Biology & Biochemistry 2011, 43: 1812–1836.

[4] H.P. Schmidt, T. Bucheli, C, Kammann, B. Glaser, A. Samuel, J. Leifeld. European Biochar Certificate (EBC). Guidelines for a sustainable production of biochar. Arbaz (CH): European Biochar Foundation, 2016.

[5] Herrera Farfán NA, López Guzmán L. (Comps.) Ciencia, compromiso y cambio social. Textos de Orlando Fals Borda ,1a Ed. - Buenos Aires: El Colectivo - Lanzas y Letras - Extensión Libros, 2012.

[6] Neves D. Evaluation of thermochemical biomass conversion in fluidized bed. PhD Thesis. University of Aveiro, 2013.

[7] Brassard P, Godbout S, Raghavan V. Pyrolysis in auger reactors for biochar and bio-oil production: A review. Biosystems Engineering 2017, 161: 80–92.